

ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗОВОГО СДВИГА ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХПОЛУПЕРИОДНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Д.т.н В.Е. Овчаренко¹, к.т.н. С.А. Тышко¹, к.т.н. В.Г. Смоляр², к.воен.н. О.Е. Забула³, Ю.Н. Черниченко³

1. Государственное предприятие Научно-исследовательский технологический институт приборостроения, г. Харьков
2. Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка
3. Национальная академия Национальной гвардии Украины, г. Харьков

Проведен анализ известных методов измерения фазового сдвига двух гармонических сигналов. Рассмотрены измерительные и вспомогательные операции для проведения амплитудно-временного аналогово-цифрового преобразования. Предложены методы измерения значения фазового сдвига на основе двухполупериодного преобразования.

Проведено аналіз відомих методів вимірювання фазового зсуву двох гармонічних сигналів. Розглянуто вимірювальні і допоміжні операції для проведення амплитудно-временного аналогово-цифрового перетворення. Запропоновано методи вимірювання значення фазового зсуву на основі двухполуперіодного перетворення

The article analyzes the known methods of measuring the phase shift of two harmonic signals identified their shortcomings. Considered a list of measuring and auxiliary operations for amplitude-time analog-to-digital conversion. Methods measurable-rhenium values of the phase shift on the basis of a full-wave transformation

Ключевые слова: фазовый сдвиг, гармонический сигнал, максимум функции, экстремум, фазометрия.

Фазовые методы измерения, преобразования и передачи информации занимают существенное место в теории и практике измерений.

Данные методы нашли широкое применение в таких областях науки и техники как: радиолокация и радионавигация, авиационная и космическая техника, геодезия, машиностроение, связь, системы неразрушительного контроля и сфера их применения постоянно увеличивается.

В основу проведения измерения фазовых сдвигов сигналов положена модель гармонического сигнала, который задается без изменений своих параметров на бесконечном интервале времени [1]. Данная модель является идеальной, на практике используют модель с финитным временным окном, то есть измерения проводятся на конечном временном интервале.

Для гармонических сигналов в измерительной технике используются такие понятия: фаза, начальная фаза, фазовый сдвиг и время запаздывания.

В настоящее время наибольший интерес для фазометрии представляет измерение фазового сдвига.

Под фазовым сдвигом [2], понимается модуль разности начальных фаз двух гармонических сигналов одной частоты.

Наиболее полная классификация методов измерения фазовых сдвигов гармонических сигналов приведена в работах [1,3,4].

В различных технических системах нашли широкое применение методы измерения на основе преобразования фазового сдвига в другие величины. К таким промежуточным величинам относятся напряжение, сила тока, корреляционная функция, временной интервал. Как правило, определение указанных величин проводится с использованием цифровых методов измерения.

К недостаткам известных методов можно отнести [1]:

- необходимость взаимной синхронизации частоты тактового генератора в процессе аналогово-цифрового преобразования входных сигналов;
- необходимость проведения операции аналогово-цифрового преобразования двух входных сигналов;
- использование калибраторов разности фаз;
- косинусоидальный характер шкалы.

Цель и постановка задачи

Определить перечень измерительных операций необходимых для проведения измерения фазового сдвига двух гармонических сигналов с использованием их двухполупериодного преобразования. Рассмотреть возможные способы определения значения измеряемой физической величины.

Изложение основного материала исследования

Пусть существует два гармонических сигнала $u_1(t)$ и $u_2(t)$, которые имеют фазовый сдвиг один относительно другого равный $\Delta\varphi$, принадлежащий интервалу от 0 до 2π . Исходя из того, что измерение фазового сдвига являются относительными измерениями, тогда запишем изменения сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$, в виде

$$u_1(t) = U_{m1} \cos(2\pi ft) \quad (1)$$

$$u_2(t) = U_{m2} \cos(2\pi ft + \Delta\varphi)$$

где: U_{m1} , U_{m2} - амплитуда сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$ соответственно; $f = \frac{1}{T}$ - частота сигналов; T - период следования сигнала.

Временная диаграмма для данных сигналов, имеющих некоторый фазовый сдвиг один относительно другого на угол $\Delta\varphi$ представлена на рис. 1.

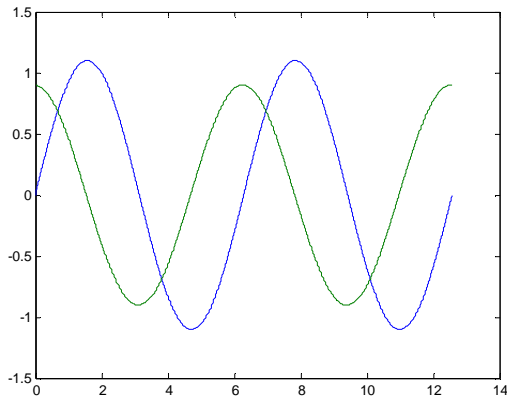


Рис. 1. Временная диаграмма сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$

Рассмотрим перечень измерительных и вспомогательных операций, которые проводятся в процессе преобразования входного сигнала.

Для обеспечения максимального уровня чувствительности проводится нормировка входных сигналов по уровню. При этом предположим, что значения амплитуд сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$ отличаются один от другого на значение не превышающее 10 %.

Для уменьшения влияния помех, наличие которых обусловлено воздействием внешних факторов проводится аппаратная фильтрация для каждого из входных сигналов.

После выполнения данной операции сигналы $u_1(t)$ и $u_2(t)$ поступают на двухполупериодный выпрямитель, в результате чего получим:

$$u'_1(t) = |u_1(t)| = |U_{m1} \cos(2\pi ft)|$$

$$u'_2(t) = |u_2(t)| = |U_{m2} \cos(2\pi ft + \Delta\varphi)|.$$

Временные диаграммы для данных сигналов представлены на рис. 2.

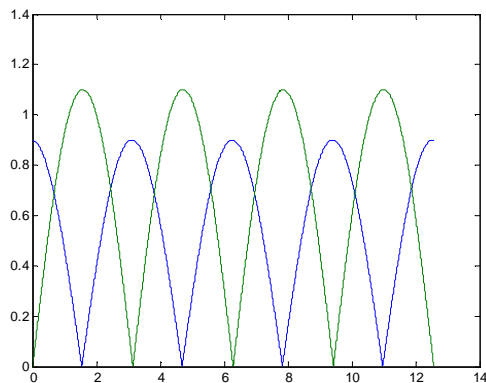


Рис. 2. Временная диаграмма сигналов $u'_1(t)$ и $u'_2(t)$

Выполнив суммирование сигналов $u'_1(t)$ и $u'_2(t)$ получим сигнал $u'_\Sigma(t)$, который описывается следующим соотношением:

$$u'_\Sigma(t) = \begin{cases} U_{1\min} + \frac{U_{1\min} - U_{2\min}}{t_{1,2}} t + \\ + (U'_{1\max} - \frac{U_{1\min} + U_{2\min}}{2}) \times \\ \times \sin\left(\left(2f - \frac{2\pi f}{\Delta\varphi}\right)t\right) \dots\dots \text{для } 0 \leq t < t_2 \\ \\ U_{2\min} + \frac{U_{2\min} - U_{1\min}}{t_{2,3}} t + \\ + (U'_{2\max} - \frac{U_{2\min} + U_{1\min}}{2}) \times \\ \times \sin\left(\left(\frac{2\pi f}{\Delta\varphi}\right)t\right) \dots\dots \text{для } t_2 \leq t < t_3 \end{cases}$$

где: $U_{1\min}$ и $U_{2\min}$ - локальные минимумы функции на интервале от 0 до $T/2$; $U'_{1\max} = (U_{m1} + U_{m2}) \cos \frac{\Delta\varphi}{2}$ - локальный максимум на интервале времени $t_{1,2} = \frac{1}{2f} - \frac{\Delta\varphi}{2\pi f}$; $U'_{2\max} = (U_{m1} + U_{m2}) \sin \frac{\Delta\varphi}{2}$ - локальный максимум на интервале времени $t_{2,3} = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f}$.

Временная диаграмма для данного сигнала, для некоторого значения фазового сдвига $\Delta\varphi$ представлена на рис.3.

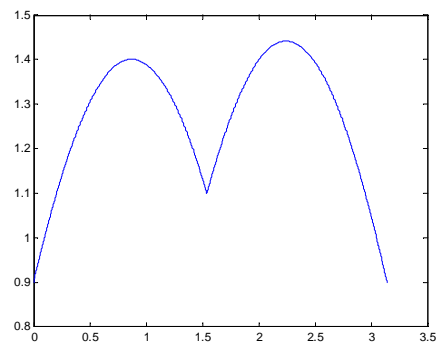


Рис. 3. Временная диаграмма сигнала $u'_\Sigma(t)$

Проведя амплитудно-временное аналогово-цифровое преобразование сигнала $u'_\Sigma(t)$, согласно [1], получим вектор:

$$u'_{\Sigma\delta} = (U_1, U_2, \dots, U_i \dots U_n)$$

где U_i - мгновенные значения сигнала $u'_\Sigma(t)$, полученные в результате проведения аналогово-

цифрового преобразования; n - количество точек дискретизации сигнала $u'_\Sigma(t)$.

Временная диаграмма для данного сигнала представлена на рис. 4.

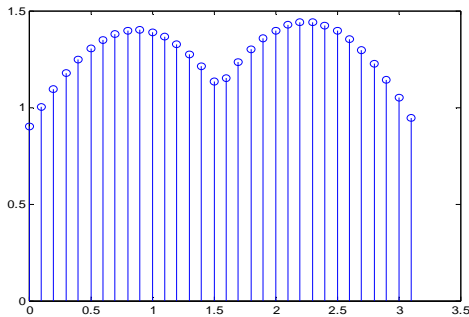


Рис. 4. Временная диаграмма сигнала $u'_\Sigma(t)$

Выбор количества точек дискретизации проводится исходя из следующих требований:

$$n \cdot \Delta t = \frac{T}{2},$$

$$n \geq n_{\min},$$

$$\Delta t \geq t_p.$$

где Δt - интервал дискретизации; t_p - время проведения одного такта аналого-цифрового преобразователя; n_{\min} - минимальное количество точек дискретизации необходимое для восстановления исходного сигнала.

Как известно, значение n_{\min} определяется с использованием теоремы Котельникова или Найквиста.

Тогда, исходя из выше изложенного материала, предлагается следующая схема проведения процедуры преобразования измеряемого сигнала, которая представлена на рис. 5, и включает в себя следующие основные измерительные и вспомогательные операции:

- 1 – проведение нормировки по уровню входных сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$;
- 2 – аппаратное удаление помех обусловленных влиянием внешней и внутренней средой из сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$;
- 3 – формирование сигнала запуска операции аналого-цифрового преобразования;
- 4 – проведение двухполупериодного преобразования входных сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$,
- 5 – суммирование сигналов $u'_1(t)$ и $u'_2(t)$;
- 6 – проведение аналого-цифрового преобразования сигнала $u'_\Sigma(t)$.

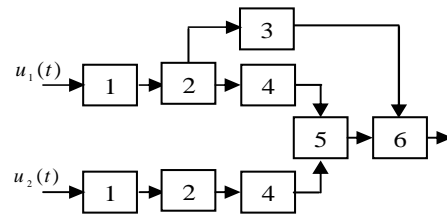


Рис. 5. Схема проведения процедуры преобразования измеряемого сигнала

Данный перечень измерительных операций реализуется с использованием технических средств.

Введя предположение, что перед началом проведения измерений фазового сдвига известна частота сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$, а в ходе выполнения аналого-цифрового преобразования за один период следования сигнала $u'_\Sigma(t)$ получено достаточное количество точек дискретизации. Тогда, для уменьшения объема вычислительной информации целесообразно перейти от функции изменения сигнала по времени к изменению функции от значения фазы $\Delta\varphi_\delta$ с использованием соотношения:

$$\Delta\varphi_\delta = \frac{\Delta t \cdot 4\pi}{T}$$

В [2] показано, что в зависимости от изменения значения фазового сдвига $\Delta\varphi$ сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$ у сигнала $u'_\Sigma(t)$ изменяются такие величин, как $U_{1\max}$, $U_{2\max}$, $U_{1\min}$, $U_{2\min}$, $\Delta t_{2,1}$ и $\Delta t_{3,2}$, а также собственно форма сигнала $u'_\Sigma(t)$.

Тогда исходя из выше указанного, необходимо провести измерение величин $U_{1\max}$, $U_{2\max}$, $U_{1\min}$, $U_{2\min}$, $\Delta t_{2,1}$ и $\Delta t_{3,2}$, либо формы сигнала $u'_\Sigma(t)$, и по известным величинам измерить собственно значение $\Delta\varphi$.

Решение данной измерительной задачи предлагается провести одним из методов:

- осциллографическим.

Суть данного метода заключается в том, что на экране цифрового осциллографа отображается сигнал $u'_\Sigma(t)$. С использованием канала горизонтального отклонения определяется значение величин $\Delta t_{2,1}$, $\Delta t_{3,2}$ и $f = \frac{1}{T}$.

Тогда значение $\Delta\varphi_1$ по известному значению $\Delta t_{2,1}$ и $f = \frac{1}{T}$ определяется с использованием соотношения:

$$\Delta\varphi_1 = 2\pi f \cdot \left(\frac{1}{2f} - \Delta t_{2,1} \right).$$

А по известным величинам $\Delta t_{3,2}$ и $f = \frac{1}{T}$ значение $\Delta \varphi_2$ рассчитывается выражением:

$$\Delta \varphi_2 = 2\pi f \Delta t_{3,2}.$$

Фазовый сдвиг $\Delta \varphi$ определяется как среднее значение величин $\Delta \varphi_1$ и $\Delta \varphi_2$.

Достоинствами данного метода измерения по сравнению с известными осциллографическими методами измерения фазового сдвига двух гармонических сигналов является возможность проводить измерения с использованием одного канала вертикального отклонения. Данное достоинство позволяет повысить точность проведения измерений с использованием цифрового осциллографа.

- совокупным методом.

Суть данного метода измерения величины фазового сдвига $\Delta \varphi$, заключается в том, что по известному вектору $u'_{\sum \delta} = (U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_n)$ определяются величины $U_{1\max}$, $U_{2\max}$, $U_{1\min}$ и $U_{2\min}$.

Поиск величин $U_{1\max}$, $U_{2\max}$, $U_{1\min}$ и $U_{2\min}$ проводится одним из численных методов изложенных в [5], при этом предполагается, что вектор $u'_{\sum \delta} = (U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_n)$ подвергся цифровой фильтрации, в результате чего исключена случайная составляющая погрешности с требуемым уровнем точности.

В соответствии с [2] значения величин $U_{1\max}$, $U_{2\max}$, $U_{1\min}$ и $U_{2\min}$ и фазовый сдвиг $\Delta \varphi$ связаны между собой следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} U_{1\max}^2 &= U_{m1}^2 + U_{m2}^2 + 2U_{m1}U_{m2} \cos \Delta \varphi, \\ U_{2\max}^2 &= U_{m1}^2 + U_{m2}^2 - 2U_{m1}U_{m2} \cos \Delta \varphi, \\ U_{1\min} &= U_{m1} \sin \Delta \varphi, \\ U_{2\min} &= U_{m2} \sin \Delta \varphi. \end{aligned}$$

Тогда записав систему из трех любых вышеуказанных уравнений и решив ее, получим значение фазового сдвига $\Delta \varphi$.

- с использованием аппарата проведения факторного эксперимента.

Анализ источника [6] по организации и проведению факторного эксперимента показывает, что как правило, данный процесс проводится в следующей последовательности:

- определение значений величины, которая подвергается исследованию;
- обоснование множества функций, которые предположительно описывают исследуемый сигнал;
- выбор показателя, который характеризует степень совпадения исследуемого сигнала и функции описывающей его;
- назначение критерия, на основании которого принимается решение о том, что исследуемый сигнал

описывается конкретной функциональной зависимостью из множества возможных;

- выбор из множества функций, той одной функции, которая наиболее полно соответствует исследуемому сигналу с использованием выбранного показателя на основе принятого решающего критерия;

- принятие решения, что исследуемый сигнал имеет те же характеристики, что и выбранная функциональная зависимость.

Тогда для полученного вектора $u'_{\sum \delta} = (U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_n)$ выбирается эталонная функций $U_{\varphi, j}$,

$$U_{\varphi, j} = \begin{cases} U_{\min} + (U_{1\max} - U_{\min}) \sin \left(\left(\pi - \frac{\pi}{\Delta \varphi_j} \right) \varphi_i \right) \\ U_{\min} + (U_{2\max} - U_{\min}) \sin \left(\left(\frac{2\pi}{\Delta \varphi_j} \right) \varphi_i \right) \end{cases}$$

которая наиболее близко соответствуют измеряемому значению фазового сдвига $\Delta \varphi_j$ согласно выбранного критерия.

Выводы.

В данной статье определен перечень измерительных и вспомогательных операций для проведения аналогово-цифрового преобразования необходимых для проведения измерения фазового сдвига двух гармонических сигналов с использованием их двухполупериодного преобразования. Определены методы измерения значения фазового сдвига. В качестве методов, измерения значения фазового сдвига двух гармонических сигналов с использованием их двухполупериодного преобразования предлагается использовать: осциллографический, совокупный и с использованием аппарата проведения факторного эксперимента. Рассмотрены основные принципы реализации каждого из выше указанных методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Куц Ю.В. Статистична фазометрія / Ю.В. Куц, Л.М. Щербак. – Тернопіль.: Тернопільський державний технічний університет., 2009. – 384с.
2. ГОСТ 16465-70 Сигналы радиотехнические измерительные. Термины и определения. – Введ. С 01.07.71. М.: Изд-во стандартов, 1987. – 27 с.
3. Волков В.М. Нестационарные процессы в элементах фазометрических систем / В.М.Волков, А.А.Иванько – К.: Техніка, 1977. – 120с.
4. Бова М.Т. Вимірювання різниці фаз у радіоелектроніці / М.Т. Бова, В. О. Гойжесвський, С. М. Маєвський, В. В. Молебний – К.: Вища школа, 1972. – 232 с.
5. Тышко С.А. Анализ возможности использования двух полупериодного преобразования для измерения фазового сдвига гармонических сигналов с равной амплитудой. / С.А.Тышко, В.Г.Смоляр – Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, – 2013. – Вип. 2 (30). С. 42 - 45.
6. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений. / П.В. Новицкий, И.А. Зограф – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.